

УДК 621.313:536.2.24:539.2

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛИНЕЙНЫЙ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Болюх В. Ф., д-р техн. наук, профессор,

Кочерга А. И., аспирант,

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина

Проведен анализ областей применения и типов линейных импульсных электромеханических преобразователей (ЛИЭП). С использованием интегрального показателя эффективности, который учитывает силовые, скоростные, энергетические, электрические и магнитные показатели, установлено, что при всех стратегиях оценки наиболее эффективным является ЛИЭП электродинамического типа, а наименее эффективным – ЛИЭП электромагнитного типа.

Ключевые слова: линейный импульсный электромеханический преобразователь, интегральный показатель эффективности, электромагнитный, электродинамический, индукционный.

ANALYSIS OF EFFICIENCY OF LINEAR PULSE ELECTROMECHANICAL CONVERTERS OF VARIOUS TYPES

Bolyuh V. F., Dr. habil. of technical sciences, professor,

Kocherga A. I., post-graduate student,

National Technical University "Kharkiv polytechnic institute", city of Kharkov, Ukraine

The analysis of application areas and types of linear pulse electromechanical converters (LPEC) is carried out. Using the integral efficiency index, which takes into account the power, speed, energy, electrical and magnetic indices, it is established that for all evaluation strategies the most effective is the LPEC of the electrodynamic type, and the least effective is the LPEC of the electromagnetic type.

Key words: linear pulse electromechanical converter, integral efficiency index, electromagnetic, electrodynamic, inductive.

Линейные импульсные электромеханические преобразователи (ЛИЭП) позволяют обеспечить высокую скорость исполнительного элемента (ИЭ) на корот-

ком активном участке, и/или мощные силовые импульсы при незначительном его перемещении. ЛИЭП используются во многих отраслях науки и техники в каче-

стве электромеханических ускорителей и ударно-силовых устройств [1–3]. В строительстве применяются электромагнитные молоты и перфораторы, устройства для забивания свай и анкером; в горной промышленности – бутобои, разделители пород, вибраторы; в геологоразведке – вибросейсмоисточники; в машиностроении – приводы станов холодной прокатки труб, прессы, молоты с большим диапазоном энергии удара; в химической и медико-биологической промышленности – вибросмесители и дозаторы. ЛИЭП применяются в магнитно-импульсных устройствах для прессования порошков керамики, очистки емкостей от налипания сыпучих материалов, уничтожения информации на цифровых носителях и др. Такие преобразователи используются в быстродействующей клапанной и коммутационной аппаратуре, в испытательных комплексах для проверки ответственных изделий на ударные нагрузки, в авиационной и космической технике, в исследовательских установках, например, для исследования микрометеоритных ударов на космические или ответственные наземные объекты.

ЛИЭП работают с коротким рабочим циклом и ударной нагрузкой, которая многократно превышает нагрузку традиционных линейных электродвигателей продолжительного действия. Наиболее широко применяются ЛИЭП индукционного (ЛИЭП-И), электродинамического (ЛИЭП-Э) и электромагнитного (ЛИЭП-М) типов [2]. В этих преобразователях происходит электромагнитное взаимодействие подвижного якоря с неподвижным индуктором, возбуждаемым от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ). В указанных типах ЛИЭП основное отличие состоит в конструкции подвижного якоря, который обеспечивает разгон ИЭ.

В ЛИЭП-И якорь представляет собой относительно тонкий медный диск, в котором индуцируются вихревые токи от индуктора, вследствие чего между ними возникает электродинамическая сила от-

талкивания. В ЛИЭП-Э якорь представляет собой подвижную катушку, которая электрически связана с индуктором, вследствие чего между ними также возникает электродинамическая сила отталкивания. В ЛИЭП-М якорь представляет собой относительно толстостенный ферромагнитный диск, на который действует электромагнитная сила притяжения со стороны индуктора.

В ЛИЭП целесообразно использовать наружный ферромагнитный экран (ФЭ) с малой электропроводностью, выполненный либо из магнитодиэлектрика, либо с радиальными разрезами [4]. Указанный экран увеличивает индукцию магнитного поля в активной зоне между индуктором и якорем и уменьшает индукцию магнитного поля рассеяния в окружающее пространство, что важно для близко расположенных электронных устройств и обслуживающего персонала.

Для оценки эффективности ЛИЭП необходимо учитывать множество различных разнородных показателей: силовые и скоростные показатели, индукции магнитных полей рассеяния, массу активных элементов, конструктивную сложность, определяющую их надежность, величину тока возбуждения индуктора, что важно для электронной системы управления. Однако такая задача не решена.

Так в работе [5] рассматривается сравнительный анализ ЛИЭП-И и ЛИЭП-Э, а в работе [6] – ЛИЭП-И и с ЛИЭП-М. Однако в этих работах анализируются только электромеханические характеристики ЛИЭП, что не позволяет комплексно оценить их эффективность.

Целью статьи является сравнительный анализ эффективности ЛИЭП различного типа при учете силовых, скоростных, электрических, конструктивных и экологических показателей.

Математическая модель ЛИЭП, описывающая быстропротекающие и взаимосвязанные электромагнитные и электромеханические процессы, проявляющиеся при перемещении якоря относительно

индуктора, представлена в работе [7]. Она описывает пространственно-временные процессы в ЛИЭП при возбуждении индуктора от ЕНЭ. Математическая модель использует метод конечных элементов при интегрировании по пространственным переменным и усовершенствованный метод Гира при интегрировании по времени. Для решения поставленной задачи была разработана расчетная компьютерная модель ЛИЭП в программном пакете *Comsol Multiphysics*, который позволяет адаптивно изменять сетку и контролировать ошибки при работе с различными численными решателями [8]. При перемещении якоря используется «деформируемая» сетка. Расчетный шаг по времени автоматически варьировался в зависимости от условий сходимости и показателей погрешности полученных решений. Решение системы уравнений осуществлялось методом BDF (*backward differentiation formula*) с фиксированным шагом по времени, неравномерной сеткой и использованием решателя PARDISO. При расчете предполагается отсутствие отдачи индуктора, деформации элементов и аксиальное расположение и перемещение якоря относительно индуктора.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛИЭП

Рассмотрим ЛИЭП различного типа коаксиальной конфигурации с одинаковыми габаритами, которые содержат ФЭ, охватывающий индуктор с торцевой и

наружной боковых сторон [4]. Якорь выполнен в форме плоского диска, одна из сторон которого обращена к индуктору, а вторая взаимодействует с ИЭ. Основные параметры ЛИЭП:

Индуктор: внешний диаметр $D_{ex1} = 100$ мм, внутренний диаметр $D_{in1} = 10$ мм, сечение медной шины $a \times b = 1,8 \times 4,8$ мм², количество витков шины $N = 46$ шт.; высота $H_1 = 10$ мм (ЛИЭП-И и ЛИЭП-М), $H_1 = 5$ мм (ЛИЭП-Э).

ФЭ: высота дискового основания $H_3 = 8$ мм, внешний диаметр обечайки $D_{ex3} = 118$ мм, внутренний диаметр обечайки $D_{in3} = 102$ мм.

ЕНЭ: емкость $C = 2850$ мкФ, напряжение $U_0 = 400$ В. Электронная система формирует апериодический импульс возбуждения индуктора с использованием обратного диода.

ИЭ: масса $m_e = 0,5$ кг.

Якорь ЛИЭП-И выполнен в виде массивного диска из технической меди высотой $H_2 = 2,5$ мм, якорь ЛИЭП-М и ФЭ – из магнитодиэлектрика с магнитными свойствами стали Ст. 10 высотой $H_2 = 2,5$ мм, якорь ЛИЭП-Э выполнен аналогично его индуктору. Начальное расстояние между индуктором и якорем $\Delta z_0 = 1,0$ мм (ЛИЭП-И, ЛИЭП-Э), $\Delta z_0 = 5,0$ мм (ЛИЭП-М).

Электромеханические характеристики рассматриваемых ЛИЭП представлены на рис. 1. В качестве электромеханических характеристик выступают j_1 – плотность тока в индукторе, f_z – электродинамические (электромагнитные) силы, действу-

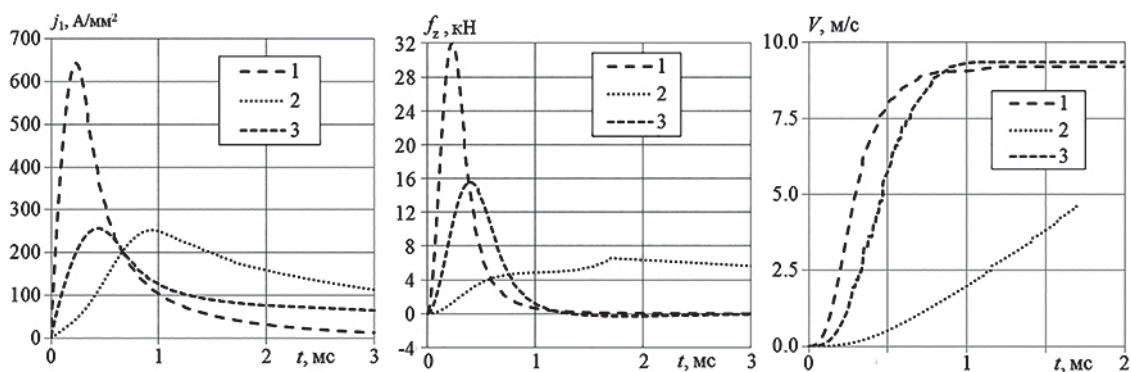


Рис. 1. Электромеханические характеристики преобразователей: 1 – ЛИЭП-Э; 2 – ЛИЭП-М; 3 – ЛИЭП-И

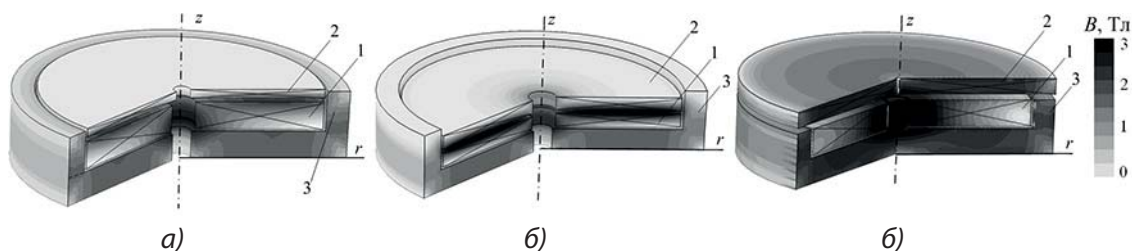


Рис. 2. Распределения индукций магнитных полей в ЛИЭП-И (а), ЛИЭП-Э (б) и ЛИЭП-М (в) в момент максимума электродинамической (электромагнитной) силы: 1 – индуктор; 2 – якорь; 3 – ФЭ

ющие на подвижный якорь со стороны индуктора, V – скорость якоря с ИЭ. В ЛИЭП-Э электромеханические процессы протекают наиболее быстро, ток в индукторе и электродинамические силы принимают наибольшие значения. В ЛИЭП-М электромеханические процессы протекают наиболее медленно, причем максимальная величина электромагнитных сил наименьшая для всех типов преобразователей.

Скорости якорей ЛИЭП-Э и ЛИЭП-И, где действуют ЭДУ отталкивания, после резкого начального возрастания практически не меняются. В ЛИЭП-М, где действует электромагнитная сила притяжения, указанная скорость постоянно растет до момента соударения якоря с ФЭ.

На рис. 2 показано распределение индукции магнитного поля в момент максимума электродинамической (электромагнитной) силы. В ЛИЭП-И наибольшая индукция магнитного поля имеет место в зазоре между индуктором и якорем. При этом на наружной поверхности якоря поле практически полностью экранировано. В ЛИЭП-Э наибольшая индукция магнитного поля появляется между якорем и индуктором, по которым протекает один и тот же ток. При этом частично магнитное поле выходит за поверхность якоря. В ЛИЭП-М максимальная индукция магнитного поля возникает во внутреннем цилиндрическом сердечнике, который охватывается индуктором. При этом наблюдается значительная индукция поля рассеяния.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ ЯКОРЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ ЛИЭП

В ЛИЭП-И и ЛИЭП-М высота якоря определяется высотой медного и ферромагнитного дисков соответственно. Высота якоря ЛИЭП-Э определяется шириной шины при неизменном количестве ее витков. При этом сечение шины индуктора остается неизменным. При увеличении высоты якоря во всех ЛИЭП происходит увеличение импульса силы F_z . Максимальная скорость якоря с ИЭ V_m от его высоты имеет более сложную зависимость. Максимальные значения скоростей рассматриваемых типов ЛИЭП реализуются при различной высоте их якорей, которая для них является оптимальной. Наименее низким является якорь ЛИЭП-И ($H_2 = 2,2$ мм), а наиболее высоким – якорь ЛИЭП-М ($H_2 = 10,5$ мм). В ЛИЭП-Э максимальная скорость реализуется при высоте якоря $H_2 = 6,1$ мм.

В табл. 1 представлены значения импульса силы $F_z = \int f_z dt$ и максимальной скорости V_m якорей при оптимальной их высоте, которая представлена в виде геометрического параметра $\varepsilon = H_2 H_1^{-1}$. Как следует из полученных результатов, при оптимальной высоте якоря наибольшая скорость развивается в ЛИЭП-Э, а наименьшая – в ЛИЭП-И. В ЛИЭП-Э и ЛИЭП-М реализуются практически одинаковые значения импульса электродинамической (электромагнитной) силы, в то время как в ЛИЭП-И импульс электродинамической силы в 1,52 раза меньше.

Таблица 1

**Значения F_z и V_m ЛИЭП
с различными типами якореЙ
при оптимальной их высоте**

Тип ЛИЭП	ε^* , о.е.	F_z , Нс	V_m , м/с
ЛИЭП-И	0,22	6,1	9,32
ЛИЭП-Э	0,61	9,3	10,82
ЛИЭП-М	1,05	9,3	9,75

При оптимальной высоте якореЙ ток в индукторе и электродинамические силы принимают наибольшие значения в ЛИЭП-Э. В ЛИЭП-М электромеханические процессы протекают наиболее медленно, причем максимальная величина силы здесь наименьшая. Скорости якоря в ЛИЭП-Э и ЛИЭП-И, где действуют электродинамические силы отталкивания, после резкого начального возрастания практически не меняются. В ЛИЭП-М, где действует электромагнитная сила притяжения, указанная скорость постоянно растет до момента соударения якоря с ФЭ.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛИЭП

Для оценки эффективности ЛИЭП с якорями, имеющими оптимальную высоту, при которой развивается наибольшая скорость, используем интегральный показатель эффективности K^* :

$$K^* = \beta \left(\alpha_1 f_{zm}^* + \alpha_2 V_m^* + \alpha_3 W_{kin}^* + \frac{\alpha_4}{j_{1m}^*} + \frac{\alpha_5}{B_{ex}^*} \right);$$

$$\sum_{j=1}^5 \alpha_j = 1, \quad (1)$$

где: j_{1m} – максимальная плотность тока в индукторе;

f_{zm} – максимальное значение силы, действующей на подвижный якорь со стороны индуктора;

V_m – максимальное значение скорости якоря с ИЭ;

W_{kin} – кинетическая энергия, развиваемая ЛИЭП;

B_{ex} – усредненное значение индукции магнитного поля рассеяния;

β – коэффициент надежности;

α_j – весовые коэффициенты соответствующих показателей.

Усредненное значение индукции магнитного поля рассеяния B_{ex} рассчитывается на контуре, расположенном на расстоянии $2H_1$ от нижней торцевой и боковой сторон и на расстоянии $4H_1$ от верхней стороны индуктора. Все показатели ЛИЭП нормированы относительно ЛИЭП-И и отмечены звездочками. Используем коэффициенты надежности для ЛИЭП-М $\beta = 1,2$, для ЛИЭП-И – $\beta = 1$, для ЛИЭП-Э – $\beta = 0,8$. Рассмотрим несколько вариантов стратегии оценки эффективности ЛИЭП, которые представлены в табл. 2.

При всех стратегиях оценки эффективности наиболее эффективным является

Таблица 2

**Варианты стратегии оценки и значения интегрального показателя
эффективности ЛИЭП, о.е.**

Вариант	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	K^* (ЛИЭП-М)	K^* (ЛИЭП-Э)
I	0,4	0,15	0,15	0,15	0,15	0,656	1,556
II	0,15	0,4	0,15	0,15	0,15	0,676	1,335
III	0,15	0,15	0,4	0,15	0,15	0,720	1,474
IV	0,15	0,15	0,15	0,4	0,15	0,829	1,218
V	0,15	0,15	0,15	0,15	0,4	0,631	2,004

ЛИЭП-Э, даже несмотря на его конструктивную сложность, а наименее эффективным является ЛИЭП-М, хотя он является конструктивно наиболее простым. В варианте стратегии V, при котором наивысший приоритет отдан величине индукции магнитного поля рассеяния, эффективность ЛИЭП-М наименьшая, а эффективность ЛИЭП-Э – наибольшая. В варианте стратегии IV, при котором наивысший приоритет отдан величине тока индуктора, эффективность ЛИЭП-М наибольшая, а эффективность ЛИЭП-Э наименьшая.

ВЫВОДЫ

При увеличении высоты якоря ЛИЭП происходит увеличение импульса элект-

родинамической (электромагнитной) силы. Наибольшая скорость при оптимальной высоте якоря развивается в ЛИЭП-Э, а наименьшая – в ЛИЭП-И. В ЛИЭП-Э и ЛИЭП-М реализуются практически одинаковые значения импульса электродинамической (электромагнитной) силы, в то время как в ЛИЭП-И импульс силы в 1,5–2 раза меньше.

С использованием интегрального показателя эффективности, который в относительном виде учитывает силовые, скоростные, энергетические, электрические и магнитные показатели, установлено, что при всех стратегиях оценки наиболее эффективным является ЛИЭП-Э, а наименее эффективным является ЛИЭП-М.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Balikci A., Zabar Z., Birenbaum L.** Improved performance of linear induction launchers // IEEE Transactions on Magnetics. – 2005. – Vol. 41. – No 1. – Pp. 171–175.
2. **Болюх В. Ф., Щукин И. С.** Линейные индукционно-динамические преобразователи. – Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing. – 2014. – 496 с.
3. **Young-woo J., Hyun-wook L., Seok-won L.** High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD // Proceeding of the conf. «22-th international conference on electricity distribution». – Stockholm, 2013, 10–13 June. – 608 p.
4. **Bolyukh V. F., Oleksenko S. V.** The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86. – No 7. – Pp. 425–431.
5. **Bissal A., Magnusson J., Engdahl G.** Comparison of two ultra-fast actuator concept // IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. – Vol. 48. – No 11. – Pp. 3315–3318.
6. **Болюх В. Ф., Олексенко С. В., Щукин И. С.** Сравнительный анализ линейных импульсных электромеханических преобразователей электромагнитного и индукционного типов // Техническая электродинамика. – 2016. – № 5. – С. 46–48.
7. **Bolyukh V. F., Luchuk V. F., Rassokha M. A., et al.** High-efficiency impact electromechanical converter // Russian Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 82. – No 2. – Pp. 104–110.
8. Comsol Multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com>

НА ПУТИ К ЭФФЕКТИВНОМУ ПРОИЗВОДСТВУ!

<http://panor.ru/linteh>

Научно-практический журнал «ЛИН-технологии: бережливое производство» по вопросам оптимизации производственного процесса, снижения издержек и себестоимости продукции.

Распространяется по подписке и на отраслевых мероприятиях. подписные индексы



24237

80871

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ

- Актуальное интервью.
- Инструменты «бережливого производства».
- Лин-технологии в антикризисном менеджменте.
- Рекомендации экспертов.
- Ресурсосбережение.
- Лучший зарубежный опыт.
- Российская практика.
- Кейсы.
- Лин-школа.

На правах рекламы



Для оформления подписки через редакцию пришлите заявку в произвольной форме по адресу электронной почты podpiska@panor.ru или позвоните по тел. 8 (495) 274-22-22 (многоканальный).